中国生态农业学报 2017 年 4 月 第 25 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2017, 25(4): 467−477

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160784

高彦春, 王金凤, 封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 467−477

Gao Y C, Wang J F, Feng Z M. Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 467−477

白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系*

高彦春[1,3], 王金凤[2**], 封志明[1,4]

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101; 2. 山西师范大学地理科学学院 临汾 041000; 3. 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室 北京 100101; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所资源利用与环境修复重点实验室 北京 100101)

摘 要: 运用 Mann-Kendall 趋势检验、突变检验和小波分析法, 对白洋淀流域 1957—2012 年 7 个气象站点气温、降水和 3 个典型水文站点径流量的变化趋势、突变点及周期性变化进行了分析, 并探讨了径流与降水和气温的响应关系, 以期为该地区生态环境保护和水资源合理利用提供基础数据支持。结果表明, 研究区年均气温呈上升的趋势, 并在 1988 年后上升趋势增大, 其中, 冬季和春季的气温增幅对气温升高贡献较大; 降水量变化相对复杂, 整体呈波动下降的趋势, 其中, 夏季降水量减少幅度最大, 达 1.72 $mm\cdot a^{-1}$。受气温升高和降水量的直接影响, 典型站点径流量呈明显下降趋势, 并在年际尺度上与气温呈负相关, 与降水变化呈显著正相关; 在年内尺度上, 则与气温和降水变化呈显著正相关。夏季径流量减少幅度最大, 阜平、倒马关和紫荆关站分别下降 0.85 $m^3\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$、0.72 $m^3\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$ 和 0.66 $m^3\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$。3 个指标的周期性变化都比较明显, 其中径流和降水的波动变化基本一致, 表明径流对降水的响应比较突出。径流变化不仅受气温和降水的影响, 还受到水利工程建设、各类农业措施等多种因素的影响。

关键词: 降雨; 气温; 径流响应; Mann-Kendall 非参数检验法; 累计距平法; 小波分析法; 白洋淀流域
中图分类号: P339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)04-0467-11

Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake Basin*

GAO Yanchun[1,3], WANG Jinfeng[2**], FENG Zhiming[1,4]

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Key Laboratory for Resources Use & Environmental Remediation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: As the largest freshwater lake in the North China Plain, Baiyangdian Lake is a key hydro-confluence that is critical for flood prevention, sedimentation mitigation, irrigation, water supply and maintenance of ecological balance of the area. Since the 1960s, surface runoff in Baiyangdian Basin has continuously dropped, water quantity greatly reduced and lake-drying frequency increased due to the impact of climate change and human activities. The decreasing water quantity has

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB452705)和国家自然科学基金重点项目(41430861, 40871198)资助
** 通讯作者: 王金凤, 主要从事遥感水文方面的研究。E-mail: wangjinfeng@lzb.ac.cn
高彦春, 主要研究方向为水文遥感和水文水资源。E-mail: gaoyanc@igsnrr.ac.cn
收稿日期: 2016-11-03 接受日期: 2017-01-06
* This research was funded by the National Program on Key Basic Research Project of China (2015CB452705), the National Natural Science Foundation of China (41430861, 40871198).
** Corresponding author, E-mail: wangjinfeng@lzb.ac.cn
Received Nov. 3, 2016; accepted Jan. 6, 2017

reduced ecological function of the lake, further affecting socio-economic development and ecological security in the region. Using observed daily temperature and precipitation data at 7 meteorological stations along with monthly runoff data from 3 typical hydrological stations for the period 1957–2012, the change characteristics in temperature, precipitation and runoff in the Baiyangdian Lake Basin were analyzed. In this study, the cumulative anomaly method, Mann-Kendall test and Morlet wavelet analysis method were used to determine the trends and abrupt changes in mean annual temperature, precipitation and runoff. The purpose of this study was to develop data support and reference base for improving ecological environment and reasonable utilization of water resources in the area. The results showed that the climate in the study area had a significant warming trend with an abrupt increase of temperature since 1988. Especially, the increase of temperature in both winter and summer contributed more to temperatures rising. Annual precipitation showed a decreasing trend with obvious fluctuation. The decrease in summer precipitation (1.72 $mm \cdot a^{-1}$) was higher than that in the other seasons. Increasing temperature along with decreasing precipitation were the dominant trends, further aggravating dry and hot climatic conditions and lake-drying in the region. There was an obvious decreasing trend in runoff due to the effect of temperature and precipitation. There was a negative correlation between runoff and temperature and a positive correlation between runoff and precipitation at annual scale. At seasonal scale, runoff was positively correlated with temperature and precipitation. Summer runoff in Fuping, Daomaguan and Zijingguan hydrological stations decreased by 0.85 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$, 0.72 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$ and 0.66 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$, respectively. The intervals of change in mean annual temperature, precipitation and runoff were obvious. Also the fluctuations in runoff and precipitation were consistent, suggesting that the response of runoff to precipitation was more prominent. The change in runoff was not only influenced by temperature and precipitation, but also by other climatic factors, water conservancy projects, agriculture and local geological conditions. In future studies, it was needed to further analyze the effect of each factor on the runoff in order to comprehensively understand the driving factors of runoff in the basin.

Keywords: Precipitation; Air temperature; Runoff response; Mann-Kendall test; Cumulative anomaly method; Morlet wavelet analysis; Baiyangdian Lake Basin

水资源是生命的源泉，是人类生存和发展过程中不可缺少和替代的重要物质资源，在社会经济可持续发展进程中具有重要的作用[1]。水循环在自然与人类社会的发展过程中具有重要的调节和控制作用，在联系“地圈-生物圈-大气圈”中起到了重要的纽带作用[2]。径流是水循环的基本环节，又是水量平衡的基本要素。作为表征水资源丰欠程度的主要指标，径流是可长期开发利用的水资源。因此，科学认识以径流为主要表征的水循环过程，是合理利用水资源的前提。

白洋淀作为华北平原最大的淡水湖泊湿地，是重要的水利枢纽，在缓洪治涝、蓄水灌溉、调节小气候和维护生态环境平衡等方面具有重要的作用。其所在的白洋淀流域隶属于大清河水系，20 世纪 60 年代以来，在气候条件和人类活动的强烈干扰下，白洋淀流域入淀的地表径流量不断减少，淀区的水资源量大幅度减少，干淀现象频繁发生；由于用水量的不断增加，大量生活污水和工业废水流入，水环境受到严重威胁。白洋淀流域水量的减少和水质的恶化，使得流域的生态功能降低，进而影响流域的社会、经济发展和生态环境安全。近年来，针对白洋淀流域气候因素和径流变化方面的研究已取得一定的成果，诸多研究者针对白洋淀流域的气候因子变化、径流变化及驱动机制、水循环机理进行了分析[3-7]：刘茂峰等[3]研究得出白洋淀流域年径流呈下降趋势且持续性较强；周玮等[4]分析了白洋淀流域出山径流的变化及其驱动因子，得出气温升高、降水减少是径流减少的主要原因，另外，工农矿用地面积的扩大也可能会引起径流的减少；王洁等[5]分析了白洋淀流域气候因子的变化，指出气温呈明显上升趋势而降水呈明显减少趋势，并预测白洋淀未来气候将继续向干热化方向发展；胡珊珊等[6]对白洋淀流域的水循环机理进行了分析模拟，得出白洋淀上游水源区年径流呈下降的趋势，并且人类活动的影响起到了主导的作用。然而，这些相关研究没有将气候因子和径流进行统一分析，而只是进行单独的研究，缺乏对两者之间响应关系的分析。因此，本文基于前人的研究，选取了白洋淀流域入淀河流上游的阜平、倒马关和紫荆关 3 个站的水文观测资料和 7 个气象站点的气温、降水数据，采用小波分析、M-K 趋势检验及突变检验法、累积距平等方法对流域内气温、降水和径流的趋势变化、突变变化和周期性以及径流对气候变化的响应进行综合分析，以期为流域的生态环境保护和水资源合理利用提供基础依据。

1 研究区概况

白洋淀流域(图 1)隶属海河流域大清河水系，位于

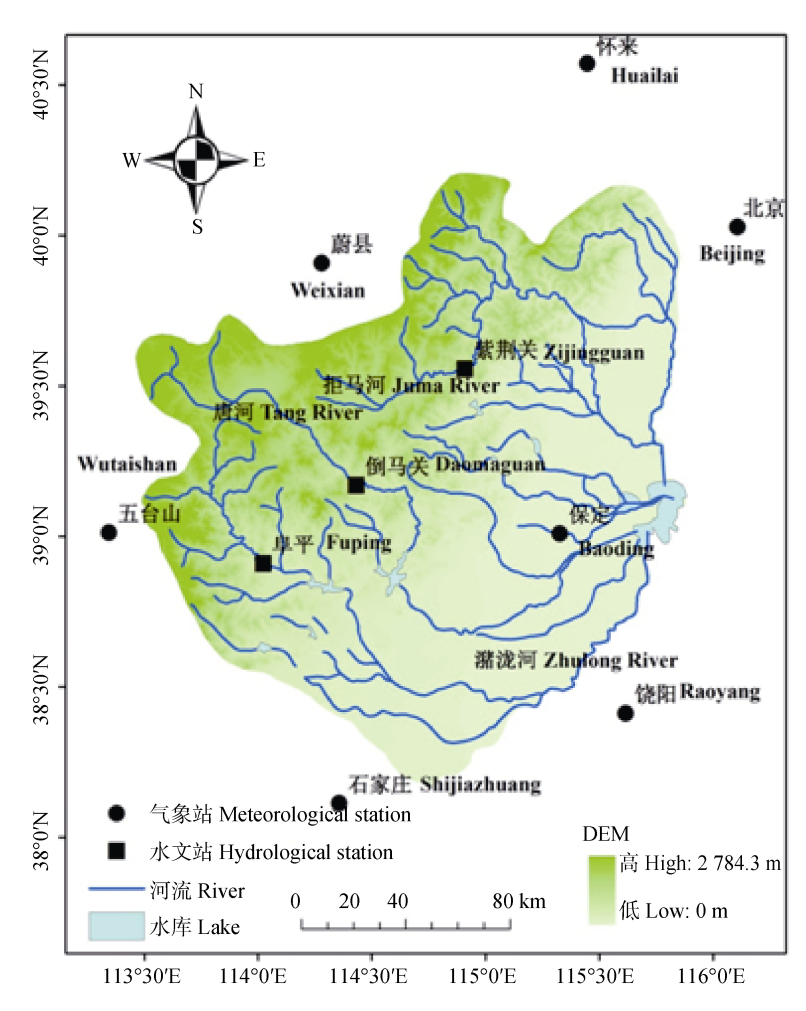


图 1　白洋淀流域河流水系、气象站和水文站分布图

Fig. 1　Sketch map of river systems, meteorological stations and hydrological stations in Baiyangdian Lake Basin

113°39′~116°11′E, 38°4′~40°4′N, 流域面积 31 200 km^2, 跨河北省、山西省和北京市。流域地势西北高, 东南低, 海拔跨度 0~2 784 m, 自西向东形成山区、平原区和洼淀区。白洋淀流域属温带季风型大陆性半湿润半干旱气候, 四季分明, 春季干旱少雨, 夏季高温多雨, 秋季天高气爽, 冬季寒冷干燥, 年平均气温在 7.3~12.7 ℃; 多年平均降水量 564 mm, 年内降水量分配极不均匀, 70%~80%集中在 6—8 月份, 多以暴雨形式出现, 空间上西部山区迎风坡降水较多, 山区背风坡和平原区降水量较少。

2　数据来源

本文选取白洋淀流域及其周边 7 个国家基本气象站 1957—2012 年的逐日气象资料, 包括逐日的降水量、平均气温、日最低气温和日最高气温 4 个气象要素, 气象数据由中国气象数据共享服务系统提供(http://cdc.cma.gov.cn); 径流数据选取分布在白洋淀流域内的紫荆关(1957—2012)、倒马关(1957—2012)和阜平(1960—2012)3 个典型水文站点的月平均径流量和年平均径流量序列数据, 其中缺测数据通过对邻近数据多元回归进行插值补齐, 径流数据主要来自水文年鉴《海河流域水文资料第三卷第四册大清河水系》。具体气象站点和水文站点分布见图 1。

3　研究方法

3.1　Mann-Kendall(MK)趋势检验

MK 检验法被广泛应用于水文气象变量的趋势检验, 包括气温、降水、径流等要素[8-9], 该方法不要求样本遵从一定的分布特征, 可以直接检验变量的变化趋势[10-13]。其检验统计量 Z 的计算方法为:

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{VAR}(S)}} & (S>0)\\ 0 & (S=0)\\ \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{VAR}(S)}} & (S<0)\end{cases} \tag{1}$$

$$\mathrm{VAR}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{2}$$

$$S=\sum_{k=1}^{n-1}\sum_{j=k+1}^{n}\mathrm{sgn}(x_j-x_k) \tag{3}$$

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_k > 0) \\ 0 & (x_j - x_k = 0) \\ -1 & (x_j - x_k < 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: n 为样本量, x_j 和 x_k 为样本量的时间序列。

统计量 Z 值为正值说明变量呈上升趋势, 反之变量呈下降趋势; 当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时表明变量在显著性水平 α 上有明显的上升或下降的趋势, 其中检验临界值 $\pm Z_{1-\alpha/2}$ 可以通过查表获取。

当样本趋势显著时, 通常采用倾斜度 β 表示系列的长期单调变化趋势, 计算公式为:

$$\beta = \operatorname{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right) \quad (\forall j < i) \quad (5)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为 i 年和 j 年的样本值。当 $\beta>0$ 时, 表明系列有上升趋势; $\beta=0$ 时, 表明系列无趋势; $\beta<0$ 时, 表明系列有下降趋势。

3.2 Mann-Kendall(MK)突变检验

对于具有 n 个样本量的时间序列 x, 构造一秩序列[12,14]:

$$S_k = \sum_{i=1}^{k} r_i \quad (k = 2,3,\cdots,n) \quad (6)$$

其中:

$$r_i = \begin{cases} +1 & (x_i > x_j) \\ 0 & (x_i \leqslant x_j) \end{cases} \quad (j = 1,2,\cdots,i) \quad (7)$$

秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下, 定义正向样本序列的统计量:

$$\mathrm{UF}_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\operatorname{Var}(s_k)}} \quad (k = 1,2,\cdots,n) \quad (8)$$

其中, $\mathrm{UF}_1=0$, $E(s_k)$ 和 $\operatorname{Var}(s_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差:

$$E(s_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (9)$$

$$\operatorname{Var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (10)$$

按时间序列 x 的逆序再重复上述过程, 同时使 $\mathrm{UF}_k=-\mathrm{UB}_k$ $(k=n,n-1,\cdots,1)$, $\mathrm{UB}_1=0$。

3.3 累积距平法

累积距平[12]是一种常用的、由曲线直观判断变化趋势的方法。对于序列 x, 其某一时刻 i 的累积距平为:

$$\hat{x}_i = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) \quad (i = 1,2,\cdots,n) \quad (11)$$

其中:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \quad (12)$$

将 n 个时刻的累积距平全部算出, 即可绘制累积距平曲线进行趋势分析。

3.4 小波分析

小波分析方法是在傅里叶分析方法基础上发展而来, 不仅可以给出气候序列变化的尺度, 还可以显示变化的时间位置, 目前已经广泛应用于水文气象要素的变化特征分析中[15-17]。小波变换的离散形式为:

$$\omega_f(a,b) = |\alpha|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{i=1}^{n} f(i\Delta t) \psi\left(\frac{i\Delta t - b}{a}\right) \quad (13)$$

式中: $\omega_f(a,b)$ 为小波系数; ψ 为母小波, 它是双窗函数, 一个是频谱窗, 一个时间窗; a 是频谱参数; b 是时间参数; Δt 为取样间隔; n 为样本量。

利用小波方差可以更准确地诊断出多长周期得振动最强, 小波方差为:

$$\operatorname{var}(a) = \sum\left[\omega_f(a,b)\right]^2 \quad (14)$$

离散化小波变换将一个一维信号在时间和频率两个方向展开, 并以此绘制横坐标为时间参数, 纵坐标为频率参数的二维图像, 分析不同长度的周期随时间的演变特征, 并判断序列存在的显著周期。

4 结果与分析

4.1 年际变化及突变分析

从 7 个气象站的年均温、年降水量和 3 个水文站的年径流量的年际变化(图 2)及突变检验(图 3)可以看出: 白洋淀流域 1957—2012 年多年平均气温为 11.36 ℃, 年平均最高温发生在 2007 年, 为 12.84 ℃, 最低温发生在 1969 年, 为 9.83 ℃。运用 MK 趋势检验得出的年平均气温的统计量 Z=6.01, 满足 α=0.001 的显著水平要求, 平均年均温增加量 β 为 0.05 ℃·a^{-1}, 说明研究区的年均温升高趋势非常明显(图 2a)。通过 MK 突变点检测法得出年均温突变年份发生在 1991 年左右(图 3a), 并通过了 α=0.05 的显著水平要求。从年平均气温的距平(图 4a)也可以看出, 年平均气温距平值不断增加, 说明研究区年平均气温不断升高, 距平值从 1991 年后基本都为正值, 且上升的速度明显快于 1991 年之前。

近 57 年来, 白洋淀流域年降水量最大值为 811.43 mm, 出现在 1959 年, 最小值为 299.66 mm, 出现在 1965 年, 年降水量的极值比为 1.71。白洋淀流域年降水量整体呈减少的趋势, 平均减少速率约为 1.87 mm·a^{-1}, 由于内部存在波动性, 故年降水量

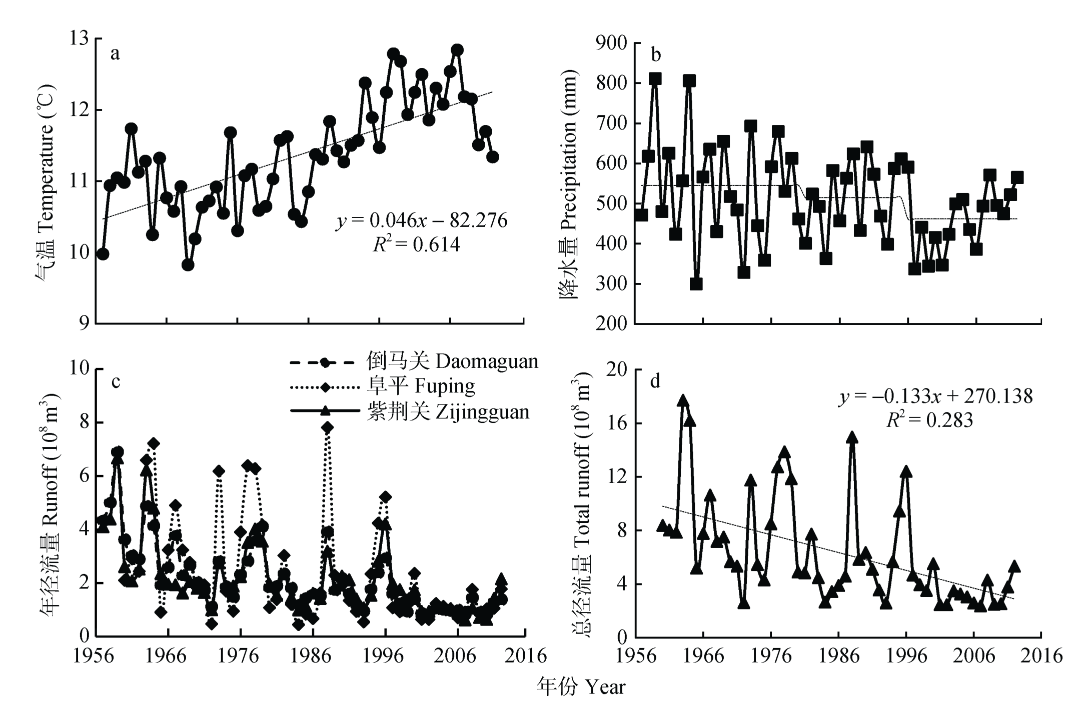


图 2　1957—2012 年白洋淀流域气温(a)、降水(b)和径流(c, d)的年际变化图

Fig. 2　Inter-annual changing trends of air temperature (a), precipitation (b) and runoff (c, d) in the study area from 1957 to 2012

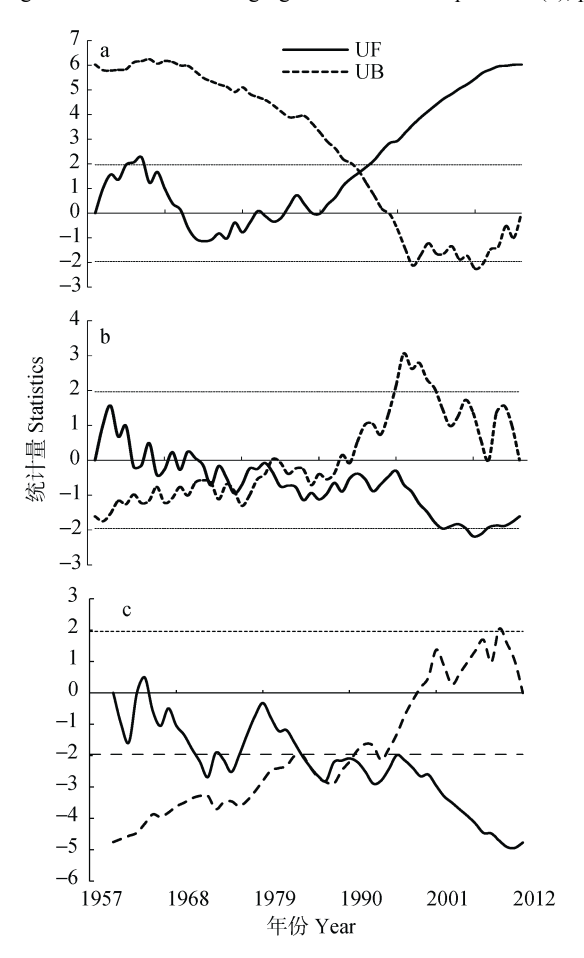


图 3　1957—2012 年白洋淀流域年平均气温(a)、年降水量(b)和年径流量(c)MK 突变判别曲线(虚线是 95%的置信水平)

Fig. 3　Trend and abrupt point detection of temperature (a), precipitation (b) and runoff (c) in the study area from 1957 to 2012 (the dotted lines are the 95% confidence levels)

的减少趋势并不明显(图 2b)。同时, MK 检验得出的 Z=–1.61，不满足α=0.05 的显著水平要求。利用 MK 突变点检测法分析研究区年降水量在 57 年间没有明显的突变点(图 3b)。

选取阜平、倒马关和紫荆关 3 个典型的水文站点来分析白洋淀流域年径流量的变化情况，本文对 3 个站点的年径流量进行汇总分析，得出 1960—2012 年径流量的最大值为 17.7×10^8 m^3，出现在 1963 年，最小值为 2.38×10^8 m^3，出现在 2007 年。年径流量的极值比为 6.44(图 2c，d)。运用 MK 趋势检验法得出年径流量的趋势分析统计量 Z=–4.76，通过 α=0.001 显著性水平，表明年径流量具有强烈的减少趋势，平均年径流量降低值 β 为 0.11×10^8 m^3·a^{-1}。根据 MK 突变检验得出年径流量的突变年份可能发生在 1984 年、1985 年、1986 年、1987 年和 1994 年左右，但只有 1984 年之前的年份满足 α=0.05 的显著性水平要求(图 3c)，从图 4c 年径流量的距平也同样看出 1984 年前后变化情况是不一致的。

为了进一步分析年径流量与年均温和年降水量之间的相关关系，分别对白洋淀流域 1957—2012 年气温、降水和 3 个站的径流量做累积距平分析(图 4)。年平均气温的累积距平值基本为负值，并呈先下降后上升的变化趋势，转折年份为 1991 年(图 4a)，说明年平均气温在该年份发生了由低温向高温的突变。降水序列的累积距平基本为正值，曲线在 1996 年经历了一次显著地波动，在 1996 年以前成波浪式

上升的趋势, 1996 年后则迅速下降至今(图 4b)。从 3 个站径流量累积距平看, 倒马关与紫荆关的径流量累积距平均为正值, 其变化趋势基本一致, 经过了增加-稳定波动-下降的趋势; 而阜平站径流的累积距平曲线波动变化显著。但 3 个站的曲线值在 1984 年后开始表现为下降趋势, 说明径流值普遍小于平均值(图 4c)。年降水量和年径流量都经过了一个增长-稳定-下降的趋势, 说明年径流量的变化对年降水量的变化具有明显的正响应; 年均温与年径流量变化趋势相反, 表明两者之间也存在一定的负响应。

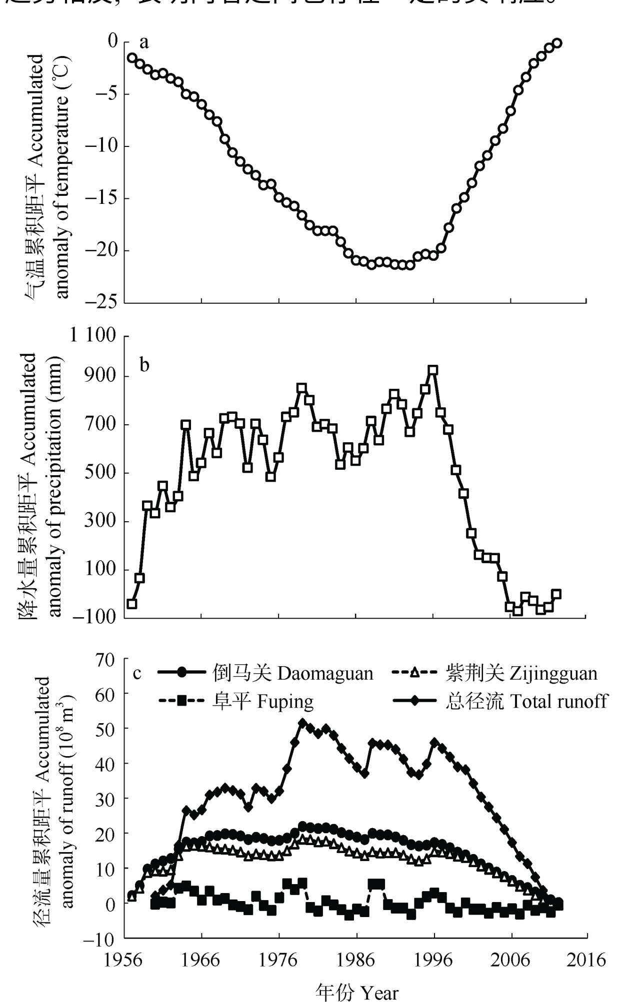


图 4 1957—2012 年白洋淀流域年均温(a)、年降水量(b)和年径流量(c)累积距平图

Fig. 4 Accumulated anomalies of air temperature (a), precipitation (b) and annual runoff volume (d) in the study area from 1957 to 2012

为进一步理解径流量与气温、降水之间的关联, 对其进行了同期的 Pearson 相关分析, 结果表明各水文站年径流量与年降水之间存在显著的正相关性, 降水量的多少会直接影响径流产量的多少, 而与年平均气温之间存在显著的负相关性, 气温的升高会引起蒸发量增加, 从而使得生成的径流量减少。但从具体分段年份来看, 1996—2012 年, 3 个水文站径流量与年降水量并不存在显著的相关性, 这是由于 1996 年后的降水呈现波动上升的趋势, 而径流量则不断下降, 而这段时间气温仍然增温显著, 因此径流量减少主要由气温升高引起。

除了气象因子的变化外, 水利工程建设、各类农业措施也会影响流域的水资源量。流域径流突变的年份基本与国家农村土地改革时间接近。1980s 早期是中国土地改革开始的时期, 这激发了农民的积极性, 通过大量的农业活动增加了农业产量, 然而, 耕地面积和水的生产效率基本不变, 这样增加的农业产量就导致了农业用水量的增加[18], 这也可以解释流域径流在 1980 年左右开始减少的原因。

另外, 白洋淀上游周边建立了 3 个大型水库——西大洋水库、王快水库和安格庄水库(龙门水库已经干枯), 修建的目的主要是防洪, 兼顾发电。但随着降水的逐年减少, 水库基本不需要发挥防洪作用; 但同时库区蓄水量也不断减少, 目前水库主要用于灌溉和生活、生产用水。近些年来, 西大洋水库主要用于唐河灌区和保定市用水; 王快水库的管理核心在于抓水质, 其水质在Ⅰ、Ⅱ类之间, 目前用于向北京市供水; 安格庄水库目前大力发展旅游业, 在发展经济的同时, 可能会对水库的水质产生影响。水库的建设破坏了水循环的天然路径, 使得水量经蒸发和渗漏后大量流失[19], 也引起径流量减少。

4.2 年代际变化

研究区降水、气温及径流量的年代际、年内差异较大(图 5)。从不同年代气温的年内分配来看, 白洋淀流域气温年内变化比较稳定, 冬季平均气温在 0 ℃以下, 其他月份平均气温在 0 ℃以上, 最高气温出现在 7 月份。从年代际来看, 各月的平均气温呈上升趋势, 增温幅度在 20 世纪 90 年代后明显增大, 这与气温年际变化图和检验出的突变年份 1991 年基本一致(图 5a)。流域年内降水分配不均匀, 当年 11 月到翌年 3 月, 流域气温偏低, 降水量偏少, 该时期降水量仅占全年降水量的 7.8%, 从 4 月份开始, 随着气温不断升高, 降水量开始增多, 到 7、8 月份达最大值, 雨热同期的年内气候特征表现的比较明显。从 20 世纪 60 年代以来, 各月降水量除了在 7、8 月份表现为明显的下降趋势外, 其他月份的降水量则变化复杂, 说明降水量的变化不仅受气温的影响, 还受到人类活动、其他气候因素的共同影响(图 5b)。

白洋淀流域内 3 个典型水文站的径流年内分配十分不均匀, 呈现明显的单峰变化, 汛期和非汛期

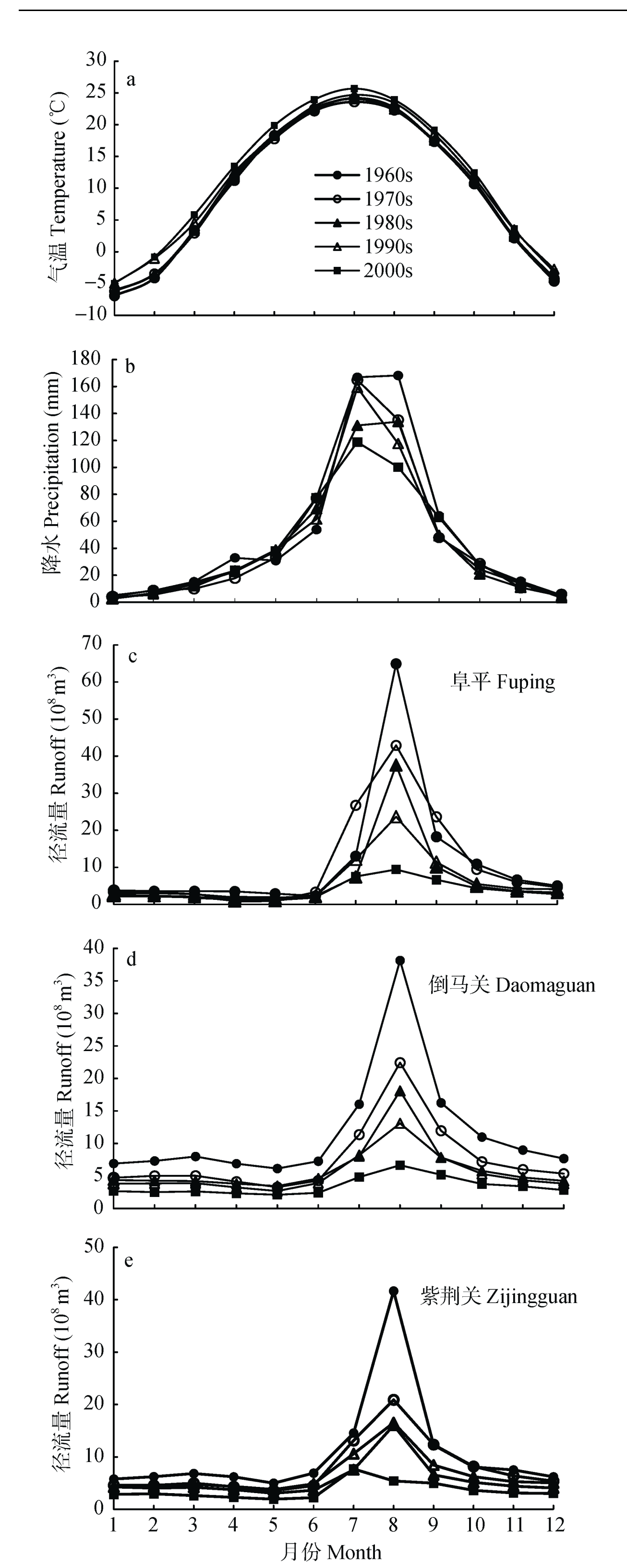


图 5　20 世纪 60 年代到 21 世纪 00 年代白洋淀流域气温(a)、降水(b)和各站径流(c, d, e)年内分布的年代际变化

Fig. 5　Inter-decadal variations of temperature (a), precipitation (b) and runoff in different stations (c, d, e) within a year in the study area from 1960s to 2000s

界线明显。阜平站、倒马关站和紫荆关站的径流量从6月份开始迅速增加，到8月份达到最高，从10月份开始又迅速消退。径流量集中在6—10月，总径流量分别占全年径流量的78%、61%和62%，其中7—9月分别占61%、48%和49%。这主要与降水的年内分配不均有关，研究区的降水主要分布在6—9月份，在7月份达到最大值，由此看来径流的年内分配与降水变化具有一致性，径流量最大值出现时间约存在1个月的滞后。从年代际来看，随着气候变暖和降水的减少，径流的年内分配在时间上也发生相应的变化，虽然各个水文站最大径流量出现的月份没变，但其径流量的大小却有着明显的变化，呈不断减少的趋势，从图得出，2000年代以来阜平站年内最大径流量比1960年代、1970年代、1980年代、1990年代分别减少85%、78%、75%和60%(图5c)，倒马关站分别减少83%、70%、63%和50%(图5d)，紫荆关站分别减少87%、74%、66%和67%(图5e)。根据MK突变检验结果分析，3个站年径流量的突变年份与前面汇总径流量的突变年份基本一致。

4.3　逐月、逐季节年际变化分析

为进一步检验年内气温、降水和径流变化的情况，分别对研究区的气温、降水和3个水文站点的径流进行逐月、逐季节年际变化趋势的检验。

从各月气温变化情况来看，12个月份的β值均大于0，并通过了95%的置信水平检验，说明气温呈明显的上升趋势(图6a)。4个季节平均气温序列的β值也均通过了95%的置信度检验，增温趋势明显，并且增温幅度以冬季最为明显，达到0.57 ℃·(10a)$^{-1}$，夏季增温幅度最小，为0.33 ℃·(10a)$^{-1}$(图6b)。流域内降水逐月和逐季节的变化情况相对气温要复杂，说明降水波动变化频繁。研究区12个月份降水序列的β值以7月和8月最大，分别为0.85 mm·a^{-1}和1.30 mm·a^{-1}，说明7、8月份减少幅度最大，并且8月份还满足95%的置信度检验，2—4月份和10—12月份虽然没有通过置信水平检验，但其β值均为负值，说明降水量也是减少的，而5、6和9月份的β均为正值，降水量在这几个月是增加的，且5月份通过了95%的置信度检验 (图6c)。降水季节变化的β值在夏季和冬季为负值，春季和秋季为正值，且夏季和冬季都满足95%的置信度检验，夏季下降幅度最大，达到1.72 mm·a^{-1}(图6d)。

就各月径流变化趋势而言，3个站12个月份的β值均小于0，且均通过了95%的置信度检验(阜平站4、5和6月份除外)，说明57年间各月径流量呈明显的减少趋势，在6—10月份减少量最为明显，其中各站8月份的径流减少达到最大，阜平、倒马关和紫荆关站

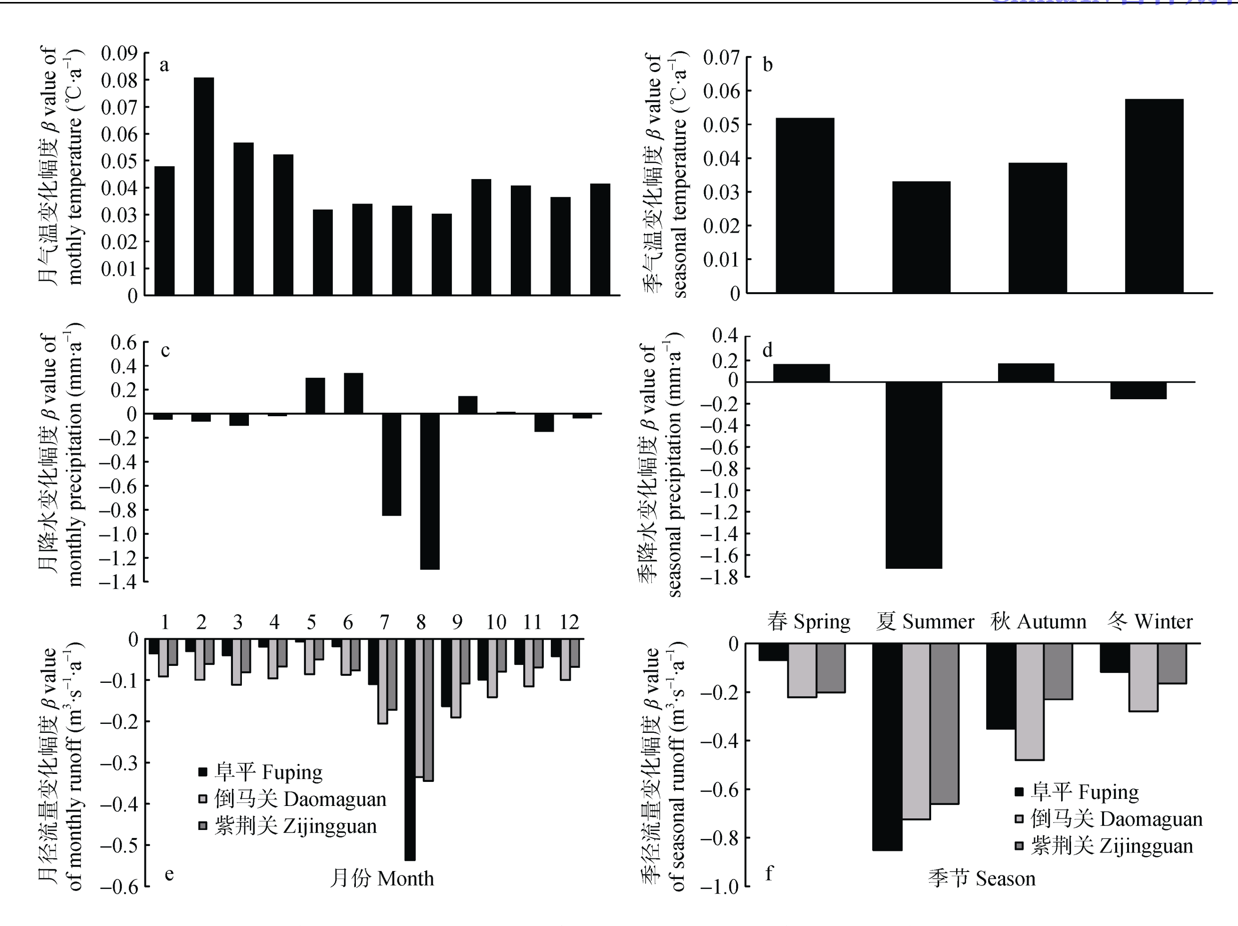


图 6 1957—2012 年白洋淀流域逐月、逐季节平均气温(a, b)、降水(c, d)和径流量(e, f)变化幅度(β)

Fig. 6 Change ranges (β) of monthly and seasonal temperature (a, b), precipitation (c, d) and runoff (e, f) in the study area from 1957 to 2012

分别为0.54 $m^3·s^{-1}·a^{-1}$、0.33 $m^3·s^{-1}·a^{-1}$和0.34 $m^3·s^{-1}·a^{-1}$(图6e)。从年内不同季节的径流分配来看，除阜平站春季，其他的都通过了95%的置信度检验，并且β均小于0，径流减少趋势明显，夏季减少幅度最大，阜平、倒马关和紫荆关站分别下降0.85 $m^3·s^{-1}·a^{-1}$、0.72 $m^3·s^{-1}·a^{-1}$和0.66 $m^3·s^{-1}·a^{-1}$(图6f)。因此，这也反映出径流量总体下降的趋势，其中夏季下降趋势最为显著。

白洋淀流域气温呈显著上升的趋势，降水量和径流量则呈下降趋势。其中冬、春季增温是气温升高主要原因，夏季增温幅度要小的多；夏季降水量和径流量的减少幅度最大，这是造成流域年内降水和径流减少的主要原因。由此看来气温和降水的年内变化对于径流量形成具有显著正相关关系，而从年际关系分析，气温的年际变化与径流年际变化呈显著负相关关系，而与年际降水呈正相关关系。

4.4 周期性变化

小波分析结果显示研究区年均气温、年降水和年径流均存在明显的周期性变化(图7)。年平均气温的小波分析图中(图7a)，小波系数等值线在[−0.5, 0.5]之间交替变化，正值表示气温偏高，负值表示气温偏低。小波系数等值线在4~5 a、8~10 a和14~15 a时间尺度上正负相位值的变化比较密集。这在小波方差中也有所体现，小波方差在4.5 a、8.0 a和14.0 a存在极值，其中14.0 a为第1主周期，4.5 a和8.0 a为主周期。从年降水的小波分析图(图7b)得出，小波系数等值线在[−1，1]之间变化，正值表明降水偏多，负值表明降水偏少。进一步分析可得小波系数等值线在2~5 a、8~10 a和13~15 a的时间段内其正负相位变化比较密集。小波方差在2.5 a、4.5 a、8.0 a和13.0 a存在极值，其中13.0 a是第1主周期，其他年份为主周期。年径流小波分析图(图7c)显示，小波系数相位变化与年降水的基本一致，说明研究区降水在经历多次雨量偏多期与偏少期的起伏波动的同时，径流同样发生了多次丰枯交替。根据小波方差得出，年径流具有2.5 a、4.5 a、8.0 a和14.0 a主周期，其中8.0 a为第1主周期。由此可以看出，降水对径流变化具有直接的影响，两者的波动周期基本一致，且径流量对降水变化有一定的滞后性响应，这在周期变化图中也有所体现，这与下垫面条件等因素有关。

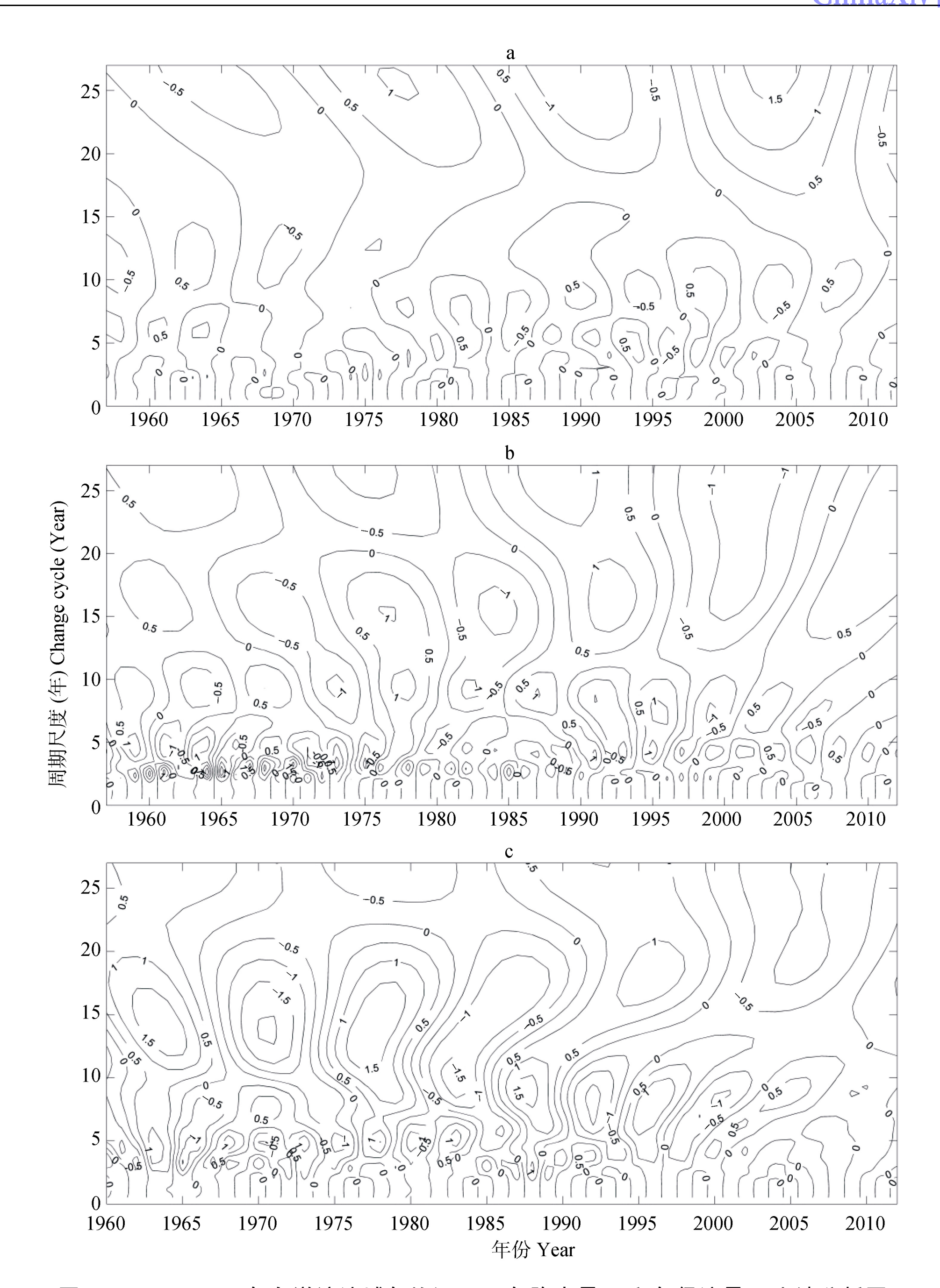


图 7 1957—2012 年白洋淀流域年均温(a)、年降水量(b)和年径流量(c)小波分析图

Fig. 7 Change cycles of annual average temperature (a), annual precipitation (b) and annual runoff (c) in the study area from 1957 to 2012

5 结论与讨论

本文基于趋势分析、突变分析和周期性分析等方法对白洋淀流域1957—2012年气温、降水和径流的变化趋势进行分析。发现年平均气温呈明显波动上升的趋势，并以1991年为突变年份，此后，年平均气温上升明显。年降水量总体表现为下降的趋势，但其年际波动较大，这也反映出该地区的降水受季风气候、海平面气压场和太平洋海温情况、大气环流、太阳运动以及温室气体等因素的影响，时空差异性较大[3]。由此看来，白洋淀流域的气候逐渐向干热化趋势发展。年径流量具有强烈的减少趋势，平均年径流量降低值为$0.11\times10^8 m^3$，年径流量的逐年减少，使得进入淀区的初始水量也不断减少，进而加剧白洋淀干淀现象。这主要是受到干热化气候的影响，其次工农用地的扩张引起的取水量的增加和水利工程的建设造成的水体蒸发量的增加也是造成径流量不断减少的一个重要原因，这方面的因素需要在以后的研究工作中作定量分析。

自20世纪60年代以来，各月的平均气温呈上升的

趋势，增温幅度以冬季最为明显，达0.57 ℃·(10a)$^{-1}$，并且整体增温幅度在90年代后明显增大，这与气温突变年份是一致的。降水量的年代际变化在7、8月份表现出明显减少的趋势，是造成流域年内降水和径流减少的主要原因，其他月份则变化复杂，说明降水量的变化不仅受气温的影响，还受到农业措施、水利工程建设等因素的共同影响。研究区汛期径流整体呈显著减少的趋势，非汛期总体也是减少的，但减少幅度比汛期要小很多，使得径流年内单峰分布格局越来越不突出。

总之，研究区气温的显著升高和降水、径流的逐渐减少已经成为主要的发展趋势，这进一步加剧了白洋淀流域的干热化和干淀的发展态势。从具体的响应关系来看，首先，通过小波分析得出研究区年均气温、年降水和年径流均存在多重时间周期尺度上的嵌套结构，其中气温的周期性规律较弱，降水与径流的变化周期一致性明显，说明径流对降水变化的响应突出；其次，流域内气温和降水的变化与径流变化趋势基本一致，只是径流量在年内和年际方面受影响的因素不同，在年尺度上受气温升高的影响，流域内蒸散发量增加，使得生成的径流量减少，加上年降水量的减少，造成径流量在年尺度上不断减少，说明气温的年际变化与径流年际变化呈显著负相关关系，而与年际降水呈正相关关系。在月、季尺度上，夏季径流量增加趋势主要受雨热同期气候特征的影响，其他月份径流量减少主要与降水量迅速减少有关，说明气温和降水的年内变化对于径流量形成具有显著正相关关系。实际上，径流变化不仅受气温和降水的影响，还受到其他气候因素、人类活动和下垫面条件变化等多种因素的影响，这些因素对流域径流量的影响，需要进一步研究，从而全面了解流域径流量的驱动因子。

参考文献 References

[1] 钱正英. 中国水资源战略研究中几个问题的认识[J]. 河海大学学报, 2001, 29(3): 1–7
Qian Z Y. About some problems in research of water resources strategy of China[J]. Journal of Hohai University, 2001, 29(3): 1–7

[2] 刘昌明. 中国水文地理[M]. 北京: 科学出版社, 2014
Liu C M. China Hydrography[M]. Beijing: Science Press, 2014

[3] 刘茂峰, 高彦春, 甘国靖. 白洋淀流域年径流变化趋势及气象影响因子分析[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1438–1445
Liu M F, Gao Y C, Gan G J. Long-term trends in annual runoff and the impact of meteorological factors in the Baiyangdian Watershed[J]. Resources Science, 2011, 33(8): 1438–1445

[4] 周玮, 吕爱锋, 贾绍凤. 白洋淀流域1959年至2008年山区径流量变化规律及其动因分析[J]. 资源科学, 2011, 33(7): 1249–1255
Zhou W, Lü A F, Jia S F. Trends and causes of runoff changes in mountainous areas of the Baiyangdian Lake Basin during the period 1959–2008[J]. Resources Science, 2011, 33(7): 1249–1255

[5] 王洁, 徐宗学. 白洋淀流域气温与降水量长期变化趋势及其持续性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1498–1505
Wang J, Xu Z X. Long-term trend and the sustainability of air temperature and precipitation in the Baiyangdian Basin[J]. Resources Science, 2009, 31(9): 1498–1505

[6] 胡珊珊, 郑红星, 刘昌明, 等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 62–70
Hu S S, Zheng H X, Liu C M, et al. Assessing the impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 62–70

[7] Wang G Q, Yan X L, Zhang J Y, et al. Detecting evolution trends in the recorded runoffs from the major rivers in China during 1950–2010[J]. Journal of Water and Climate Change, 2013, 4(3): 252–264

[8] Xu Z X, Chen Y N, Li J Y. Impact of climate change on water resources in the Tarim River basin[J]. Water Resources Management, 2004, 18(5): 439–458

[9] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1/4): 144–150

[10] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometric, 1945, 13(3): 245–259

[11] Kendall M G. Rank Correlation Measures[M]. London: Charles Griffin, 1975

[12] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007: 1–296
Wei F Y. Technology of Statistical Diagnosis and Prediction of Modern Climate[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 1–296

[13] Burn D H, Hag Elnur M A. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology, 2002, 255(1/4): 107–122

[14] 陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1331–1341
Chen Y N, Xu C C, Yang Y H, et al. Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(11): 1331–1341

[15] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005
Wang W S, Ding J, Li Y Q. Hydrology Wavelet Analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005

[16] 王蕊, 姚治君, 刘兆飞, 等. 雅鲁藏布江中游地区气候要素变化及径流的响应[J]. 资源科学, 2015, 37(3): 619–628
Wang R, Yao Z J, Liu Z F, et al. Changes in climate and runoff in the middle course area of the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Resources Science, 2015, 37(3): 619–628
[17] 刘兆飞, 王翊晨, 姚治君, 等. 太湖流域降水、气温与径流变化趋势及周期分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1575–1584
Liu Z F, Wang Y C, Yao Z J, et al. Trend and periodicity of precipitation, air temperature and runoff in the Taihu Lake Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9): 1575–1584
[18] Hu S S, Liu C M, Zheng H X, et al. Assessing the impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(5): 895–905
[19] 杨春霄. 白洋淀入淀水量变化及影响因素分析[J]. 地下水, 2010, 32(2): 110–112
Yang C X. Analysis on the deposited quantity variation and its influenced factors in Baiyang Dian[J]. Ground Water, 2010, 32(2): 110–112